

Р и с. 4. Состояние оболочек ТВС ИРТ-3М в зависимости от выгорания  $^{235}\text{U}$

чением продолжительности переходного периода при выходе на мощность, но позволяют существенно уменьшить тепловую нагрузку на твэлы и, как следствие, улучшить радиационную обстановку на реакторе и в окружающей среде. Более того, есть основания полагать, что выгорание  $^{235}\text{U}$  в ТВС ИРТ-3М можно довести до 70% вместо проектного 40% и при этом в

1,4 раза снизить риск разгерметизации алюминиевой оболочки твэлов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Кушаковский В.И. Проблемы создания топлива для энергетических ядерных реакторов. — Атомная энергия, 1978, т. 45, вып. 6, с. 426—428.
2. Ластман Б. Радиационные явления в двуокиси урана. М.: Атомиздат, 1964.
3. Досимбаев А.А. Конверсия реактора ВВР-СМ АН РУз на использование диоксид-уранового топлива 36%-ного обогащения изотопом  $^{235}\text{U}$ . Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. ИЯФ АН РУз, Ташкент, 2009.
4. Baytelesov S.A., Dosimbaev A.A., Koblik Yu.N. et al. About some characteristics of WWR-SM reactor at work with the low enriched nuclear fuel. — J. Nucl. Rad. Phys., 2006, v. 1, № 2, p. 119—127.
5. Досимбаев А.А., Байтелесов С.А., Коблик Ю.Н., Салихбаев У.С. Активность воды и воздуха при работе реактора ВВР-СМ с топливом 36%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$ . — Известия РАН. Серия физ., 2009, т. 73, № 2, с. 283—286.
6. Досимбаев А.А., Байтелесов С.А., Коблик Ю.Н. и др. Установка контроля герметичности оболочек ТВС. — В сб.: Межд. конф. «Ядерная и радиационная физика». Алматы, Казахстан, 2008, с. 649—650.

Поступила в Редакцию 9.08.10

УДК 621.039.524.4-97.519.86

#### ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ВК-50

Семидоцкий И.И., Антонов С.Н., Жителев В.А., Котов Н.П. (ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград),  
Махин В.М. (ОАО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, Московская обл.),  
Кебадзе Б.В., Шурупов В.А. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск)

В системах внутризонного контроля корпусных кипящих реакторов широко используются корреляционные методы измерения расхода теплоносителя, основанные на оценке времени запаздывания сигнала между аксиально расположенными датчиками. Одна из наиболее распространенных схем такого измерения — определение взаимных вероятностных характеристик флуктуаций нейтронного потока с помощью расположенных в активной зоне неподвижных датчиков локальной нейтронной мощности на основе, например, детекторов прямого заряда [1, 2].

Другим вариантом является использование подвижных сдвоенных детекторов с относительно небольшим расстоянием между ними.

Такие датчики позволяют определить зависимость скорости распространения возмущения нейтронного потока по высоте активной зоны от локальной структуры потока пароводяной смеси. В настоящей статье представлены результаты высотных измерений при внутризонном контроле энерговыделения ВК-50 [3].

**Обзор зарубежных исследований.** Использование взаимной корреляционной функции токов разнесенных по высоте датчиков для определения параметров пароводяного потока в активной зоне корпусных кипящих реакторов восходит к началу 1970 гг., когда появились публикации о результатах измерений на АЭС «Линген» (ФРГ) [4], «Гарильяно» (Италия) [5], «Фукусима-1» (Япония) [6] и др. Методологи-

ческая основа этих исследований была представлена в работе [7] и развита в дальнейших публикациях, например, [8, 9].

В работе [7] рассматривалась двухкомпонентная модель шумов нейтронного потока. Локальная составляющая шумов связывалась с генерацией и движением пузырей пара, глобальная — с общим влиянием плотности теплоносителя на реактивность системы. Отсюда естественно предположить, что определенная методом взаимной корреляционной функции токов скорость является скоростью паровой фазы, что и делалось в ранних исследованиях [10].

Однако по мере накопления опытных данных число анализируемых гипотез расширялось, что было обусловлено, например, спецификой измерений в BWR. Типичные параметры измерений взаимной корреляционной функции токов следующие [4, 11]:

Расстояние между (неподвижными) детекторами, м . . .	~1
Время распространения возмущения нейтронного потока, с . . .	0,1—0,3
Скорость распространения возмущения, м/с . . .	3,8—5,5

Очевидно, что по причине большого расстояния между детекторами, сопоставимого с высотой активной зоны, такие измерения могут использоваться лишь в качестве первого приближения, а их интерпретация как средства определения локальной скорости паровой фазы проблематична.

Кроме того, в BWR взаимная корреляционная функция измеряется на стыке четырех ТВС. В результате наряду с основным пиком, положение которого обычно связывают со скоростью паровой фазы, взаимная корреляционная функция в верхней части активной зоны BWR может иметь и другие пики. Наличие последних может быть объяснено как особенностями дисперсно-кольцевого режима течения (возмущения от пузырей пара и капель жидкости), так и различием характеристик пароводяного потока в окружающих датчик ТВС [12—14].

Значительно более высокое пространственное разрешение, близкое к условиям на ВК-50, имеют измерения на АЭС «Додевард» (Нидерланды) с BWR — реактором с всережимной естественной циркуляцией теплоносителя, тепловой мощностью 180, электрической 58 МВт, длиной твэла 1790 мм, ТВС в целом — около

1900 мм [2]. Почти такие же параметры имеет ВК-50. Для измерения скорости теплоносителя методом взаимной корреляционной функции токов использовали двойной детектор нейтронов с эмиттерами на основе сплава кадмия и магния. Расстояние между эмиттерами составляло ~10 см.

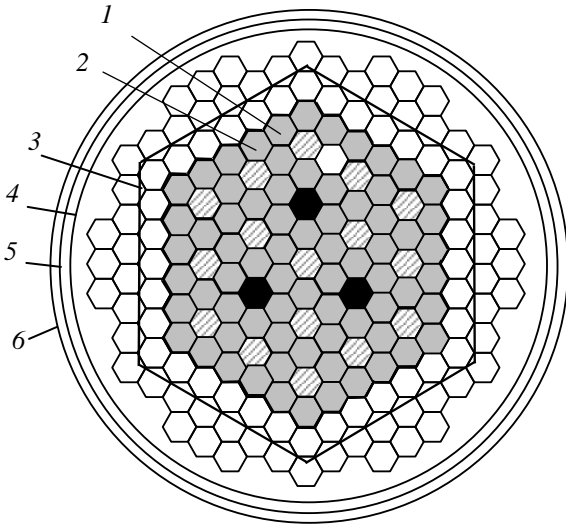
Один из основных выводов анализа взаимной корреляционной функции токов двойного детектора [2] — измеренная скорость является комбинацией скорости жидкой и паровой фаз и она меньше скорости паровой фазы.

Для интерпретации этого результата выполнены специальные эксперименты на петлевой установке, через которую прокачивали воздушно-водяную смесь и измеряли взаимную корреляционную функцию токов двух разнесенных по высоте рабочего канала датчиков на основе фотоэлементов. Результаты испытаний оказались еще более сложными для интерпретации, поскольку определенная скорость как жидкости, так и пузырей воздуха оказалась больше расчетной.

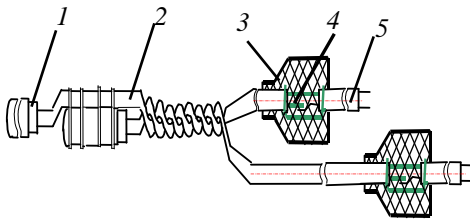
Результаты измерений послужили основанием для критики наиболее распространенной гипотезы о том, что методом взаимной корреляционной функции шумов нейтронного потока определяется скорость паровой фазы [1, 15, 16]. В частности, широкое распространение получила гипотеза о том, что измеряется приведенная объемная скорость пароводяной смеси [16].

Цель настоящей работы — измерить и сопоставить с результатами расчета по различным моделям скорость распространения возмущения нейтронного потока по высоте активной зоны ВК-50.

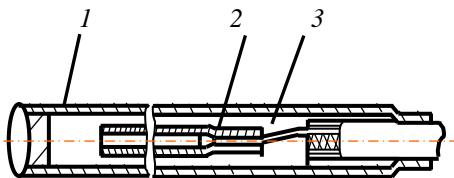
Активная зона ВК-50 высотой 2000 мм состоит из 72 рабочих ТВС, 16 рабочих органов регулирования реактивности и трех рабочих органов быстродействующей аварийной защиты (рис. 1). В специальных «сухих» каналах, установленных в центральной части двух ТВС, располагали двойные детекторы, конструкция которых показана на рис. 2, 3. Эмиттером служила проволока диаметром 0,5, длиной 50 мм из родия или гафния. Эмиттеры каждого двойного детектора изготавливали из одного и того же материала. Наружный диаметр корпуса чувствительной части составлял 3 мм. Выводы изготавливали на основе термпарного кабеля марки КТМС (ХА)-2×0,06 диаметром 1,5 мм. Соедини-



Р и с. 1. Картограмма активной зоны: 1, 2 — детекторы прямой зарядки; 3 — выгородка тягового участка; 4 — шахта; 5 — разделительная обечайка; 6 — корпус реактора; ● — кассета аварийной защиты; ◐ — регулятор реактивности; ◑ — ТВС; ○ — свободные ячейки, закрытые пробками



Р и с. 2. Конструкция двойного детектора прямой зарядки: 1 — чувствительный элемент; 2 — кабель; 3 — узел разделки кабеля; 4 — фоновая жила; 5 — удлинительный кабель



Р и с. 3. Конструкция чувствительного элемента детектора: 1 — коллектор; 2 — эмиттер; 3 — изолятор

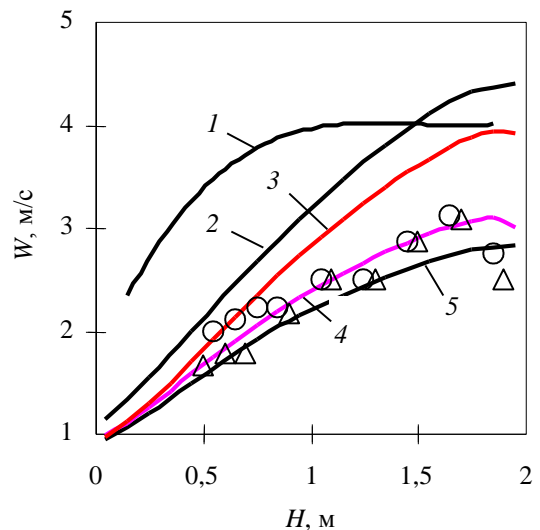
тельные кабели для обеспечения жесткости конструкции и достаточной гибкости витые, что важно при их перемещении на изогнутых участках каналов. Для исключения влияния на выходной сигнал линий связи предусмотрена фоновая жила. Материал основной и фоновой жилы — хромель. Два спаренных детектора расположены на фиксированном расстоянии 200 мм один от другого.

Детекторы устанавливали в каналы до упора, т.е. ниже топливной части ТВС. Затем их поднимали вверх с фиксированным шагом (10 или 20 см), на каждом шаге выдерживали опре-

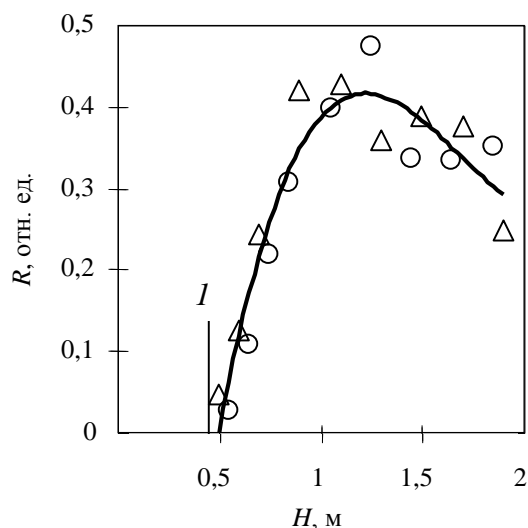
деленное время для стабилизации выходных сигналов датчиков, после чего измеряли выходные сигналы. Реактор работал в номинальном режиме: давление 5 МПа, тепловая мощность 200 МВт.

Для регистрации использовали мгновенный компонент тока родиевого детектора, который составлял около 10% общего сигнала. Сигнал гафниевого детектора почти безынерционен. Используемая аппаратура позволяет проводить измерения в диапазоне тока  $2 \cdot 10^{-11}$ — $10^{-7}$  А в полосе частот до 100 Гц.

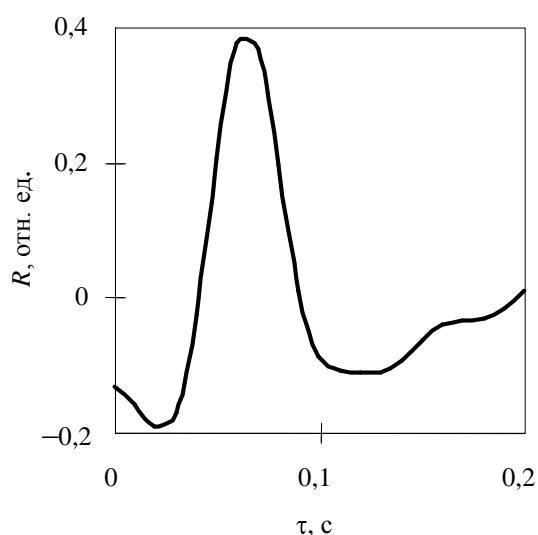
Для каждой высотной отметки с частотой опроса по каждому детектору 100 Гц формировали четыре временных ряда, которые подвергали корреляционной обработке. Скорость распространения возмущения нейтронного потока определяли по времени сдвига максимума взаимной корреляционной функции и уточняли спектральным методом [17]. Погрешность измерения временного запаздывания с учетом характеристик сигналов оценивали согласно [18], объем выборки обеспечивал погрешность в пределах  $\pm 2,5\%$  измеряемой с доверительной вероятностью 0,95. Скорость и корреляция в точке максимума взаимной корреляционной функции представлены на рис. 4, 5. Пример взаимной корреляционной функции приведен на рис. 6. На рис. 4 приведены также расчетные данные для



Р и с. 4. Измеренная по высоте активной зоны с помощью гафниевого (○) и родиевого детектора (△) скорость распространения возмущения нейтронного потока и расчетная скорость распространения возмущения объемного паросодержания (1), скорость пара (2), приведенная объемная скорость пароводяной смеси (3), скорость межфазной поверхности (4), скорость воды (5)



Р и с. 5. Распределение по высоте активной зоны ВК-50 коэффициента взаимной корреляции  $R$  токов двойных детекторов прямой зарядки: 1 — расчетная граница пузырькового и снарядного режимов течения пароводяного потока в ТВС;  $\circ$  — гафний;  $\Delta$  — родий; — — — — — сглаженное значение



Р и с. 6. Взаимная корреляционная функция токов гафниевых детекторов на высотной отметке 0,95 м

различных параметров пароводяной смеси, в том числе скорость фаз, полученная с помощью кода RELAP/mod3.3 [19]. Модель парогенерирующего канала описана в работе [20].

Скорость распространения малых возмущений локального объемного паросодержания определяли численным расчетом по модели кода RELAP/mod3.3 путем варьирования граничных условий (скорости и/или температуры воды на входе ТВС). Результаты не зависят от параметра возмущения.

Скорость движения межфазной поверхности  $w_i$  вычисляли в предположении, что коэффици-

енты трения жидкости и пара на ней равны. Тогда известное выражение [21] для этого параметра приобретает вид

$$w_i = \frac{\sqrt{\chi} (w_g - w_l) - (\chi w_g - w_l)}{1 - \chi}, \quad (1)$$

где  $\chi$  — отношение удельного объема жидкости и пара;  $w_g, w_l$  — истинная скорость пара и жидкости соответственно.

Приведенная объемная скорость  $w_v$  пароводяной смеси представляет отношение объемного расхода теплоносителя к сечению ТВС

$$w_v = \phi w_g + (1 - \phi) w_l. \quad (2)$$

В расчете по зависимостям (1), (2) входящие в них параметры определяли с помощью кода RELAP5/mod3.3.

Качественно результаты сопоставления экспериментальных и расчетных данных можно охарактеризовать следующим образом:

явно выраженные возмущения нейтронного потока возникают вместе с формированием относительно крупных пузырей пара при переходе от пузырькового к снарядному режиму течения теплоносителя, что отражается в уровне корреляции сигналов (см. рис. 5);

скорость возмущения нейтронного потока связана со структурой двухфазного потока и наиболее адекватно описывается зависимостью (1) для скорости движения межфазной поверхности, и только для начального участка после границы пузырькового и снарядного течения опытные данные соответствуют приведенной объемной скорости пароводяной смеси (см. рис. 4).

**Выводы.** Развитие идеи интерпретации взаимной корреляционной функции шумов нейтронного потока в критериях «измеряется скорость паровых пузырей», «измеряется приведенная объемная скорость пароводяной смеси» приводит к исследованию пространственно-временной структуры пароводяного потока. С этой точки зрения использование в качестве критериальной величины скорости движения межфазной поверхности представляется следующим логичным шагом. Действительно, при малых размерах пузырей пара пароводяная

смесь для датчиков представляется гомогенной, как и межфазная поверхность непрерывной. Поэтому корреляция сигналов двойного детектора для такой области наблюдается лишь для глобального компонента нейтронного шума.

При формировании крупных пузырей пара скачкообразное изменение плотности при прохождении через контролируемую датчиком область пространства четко выраженной межфазной поверхности вызывает скачкообразное изменение нейтронного потока, регистрируемое детектором. В результате коэффициент взаимной корреляции растет. Наконец, с ростом пузырей и формированием дисперсно-кольцевого потока основными носителями межфазной поверхности становятся относительно медленно движущиеся капли жидкости. Как следствие в верхней части активной зоны (см. рис. 4) скорость распространения локальных возмущений нейтронного потока снижается.

Таким образом, с качественной точки зрения принятие критерия «измеряется скорость движения межфазной поверхности» дает универсальный инструмент для интерпретации результатов взаимной корреляционной функции флюктуаций нейтронного потока во всей области параметров двухфазного потока. Отсутствие достаточной эмпирической базы при этом не является недостатком подхода, а лишь отражает состояние проблемы. Данные внутриреакторных измерений могут служить источником дополнительной информации для расширения этой базы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chaudhary V., Kulkarni A., Arora K. e.a.** Determination of mass flow rates from measured in-core two-phase flow transit times in a boiling water reactor. — *J. Nucl. Sci. Technol.*, 1995, v. 32, № 5, p. 415—424.
2. **Hagen T.** Stability monitoring of a natural-circulation-cooled boiling water reactor. Doctoral Thesis. Delft University of Technology, 1989.
3. **Лещенко Ю.И., Садулин В.П., Семидоцкий И.И.** Система контроля энерговыделения в активной зоне кипящего реактора. — *Атомная энергия*, 1987, т. 63, вып. 6, с. 410—412.
4. **Wach D.** Ermittlung Lokaler Dampfbblasen Geschwindigkeiten Rauschsignalen von Incore-Ionisationskammern. — *Atomwirtschaft*, 1973, № 6, S. 580—582.
5. **Seifritz W., Cioli F.** On-load monitoring of local steam velocity in BWR cores by neutron noise analysis. — *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 1973, v. 17, p. 451—453.
6. **Ando Y., Naito N., Tanabe A. e.a.** Void detection in BWR by noise analysis. — *J. Nucl. Sci. Technol.*, 1975, v. 12, № 9, p. 597—599.
7. **Akcasu A.Z.** Mean square instability in boiling reactors. — *Nucl. Sci. Engng*, 1961, v. 10, № 4, p. 337—345.
8. **Wach D.** Investigation of the joint effect of local and global driving sources in incore-neutron noise measurements. — *Atomkernenergie*, 1974, v. 23, № 4, p. 244—250.
9. **Аркадов Г.В., Овчаров О.В., Павелко В.И. и др.** Измерение расхода теплоносителя через топливный канал ВВЭР-440 по флюктуациям сигналов датчика прямого заряда. — *Атомная энергия*, 2001, т. 91, вып. 3, с. 167—174.
10. **Nash G.** An appraisal of subcooled boiling and slip ratio from measurements made in the Lingen boiling water reactor. — *Nucl. Technol.*, 1980, v. 5, p. 13—20.
11. **Naito N., Ando Y., Yamamoto F. e.a.** Estimation of fuel channel inlet flow rate by noise analysis. — *J. Nucl. Sci. Technol.*, 1980, v. 17, № 5, p. 351—358.
12. **Analytis G., Lübbsmeyer D.** Studies of annular flows in an air-water loop by stochastic analysis techniques. — *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 1983, v. 45, p. 845—846.
13. **Analytis G., Lübbsmeyer D.** Two-phase flow velocity measurements in the upper part of a BWR. — *Ibid.*, 1983, v. 45, p. 846—847.
14. **Analytis G., Lübbsmeyer D.** Nonintrusive velocity measurements in BWR string between four unequally rated bundles. — *Ibid.*, 1984, v. 47, p. 522—524.
15. **Колесов В.Ф., Леппик П.А., Павлов С.П. и др.** Динамика ядерных реакторов. Под ред. Я.В. Шевелева. М.: Энергоатомиздат, 1990.
16. **Lübbsmeyer D.** On the physical meaning of the fluid velocity measured in BWRs by noise analysis. — *Ann. Nucl. Energy*, 1983, v. 10, № 5, p. 233—241.
17. **Павелко В.И.** Новые спектральные методы оценки времени запаздывания в реакторно-шумовых исследованиях. — *Атомная энергия*, 1987, т. 63, вып. 4, с. 268—269.
18. **Кебадзе Б.В.** Анализ статистической погрешности и оптимизация корреляционных расходомеров. — Там же, 1984, т. 56, вып. 1, с. 15—20.
19. **RELAP5/mod3.3 Code Manual, V. I. Code Structure, System Models and Solution Methods.** NUREG/CR-5535, Idaho, 2003.
20. **Семидоцкий И.И.** Опыт применения теплогидравлического кода RELAP5/mod3.2 для моделирования статических и динамических режимов корпусного кипящего реактора ВК-50. — *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов*, 2005, вып. 1, с. 28—38.
21. **Кузнецов Ю.Н.** Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.

Поступила в Редакцию 5.04.10